第3章

GHz回路の設計事例

～ブロック図から回路図へ，回路図からプリント基板へどのように展開していくのか～

津野 徹

第２章では，GHzに関する基礎的な事柄について説明した．ここではGHzに関する知識を深めるため，実際の回路・配線の設計事例を紹介する．（編集部）

1 高周波機器のブロック図を理解する

一般的な高周波機器のブロック図は，**図1**のようになっています．これら高周波機器は，主に次のようなコンポーネント（機能を持った部品）で構成されています．

① 基準水晶発振器（X'tal）

周波数の基準となります．高周波機器の心臓部であり，水晶振動子を使ったコンポーネントが一般的です．通常，10MHz（縦型カット水晶振動子が一番安定する周波数）の基準周波数が多く用いられます．ブロック図中では「X'tal」と表されます．

② 掃引発振器（OSC）

周波数可変発振器（VCO，VCXO）の制御電圧を変化させ，周波数を可変できるようにしたコンポーネントです．最近の高性能機器は，基準水晶発振器の10MHzを基に，PLL（Phase-Locked Loop）などを使って発振周波数を高い精度をもって変化させています．

③ 周波数ミキサ（MIXER）

アナログ周波数掛け算器で周波数を変換するコンポーネントです．ダイオードなどでスイッチング（掛け算）を行います．$\sin\alpha \times \cos\beta$などの演算を行います．

高い搬送波周波数を低い搬送波周波数に変換するため，ベース・バンド信号を復調する目的で使用されます．

④ 周波数フィルタ（HPF，LPF，BPF，BEF）

周波数変換の際に，イメージ周波数[注1]が発生するので，これらを削除したりするコンポーネントです．

帯域により4種類に分類されます．

- HPF（High-Pass Filter）；高い周波数を通過させる
- LPF（Low-Pass Filter）；低い周波数を通過させる
- BPF（Band-Pass Filter）；目的の周波数を通過させる
- BEF（Band-Eliminate Filter）；目的の周波数を取り除く

⑤ アンプ（AMP）

小さな信号を増幅したり，インピーダンスを変換したりするコンポーネントです．低ノイズ・アンプ（LNA：Low Noise Amplifier），バッファ・アンプ（Buffer Amplifier），パワー・アンプ（Power Amplifier）など，用途によってさまざまなアンプがあります．

⑥ アッテネータ（ATT）

大きな信号を必要なレベルに変換するコンポーネントです． アンプのゲインを調節しても同じことはできるのですが，周波数特性が変化してしまうためアッテネータで調節するのが一般的です．ところが，最近は10dB，20dBの範

注1：ある周波数に対して乗算を行ったときに，差の周波数が等しくなる周波数は二つ存在する．使用しない側をイメージ周波数という．

KeyWord　X'tal，VCO，VCXO，OSC，MIXER，HPF，LPF，BPF，BEF，ATT，レベル・ダイヤグラム，SPICEシミュレータ，B2 SPICE，ウィルキンソン型4分配器

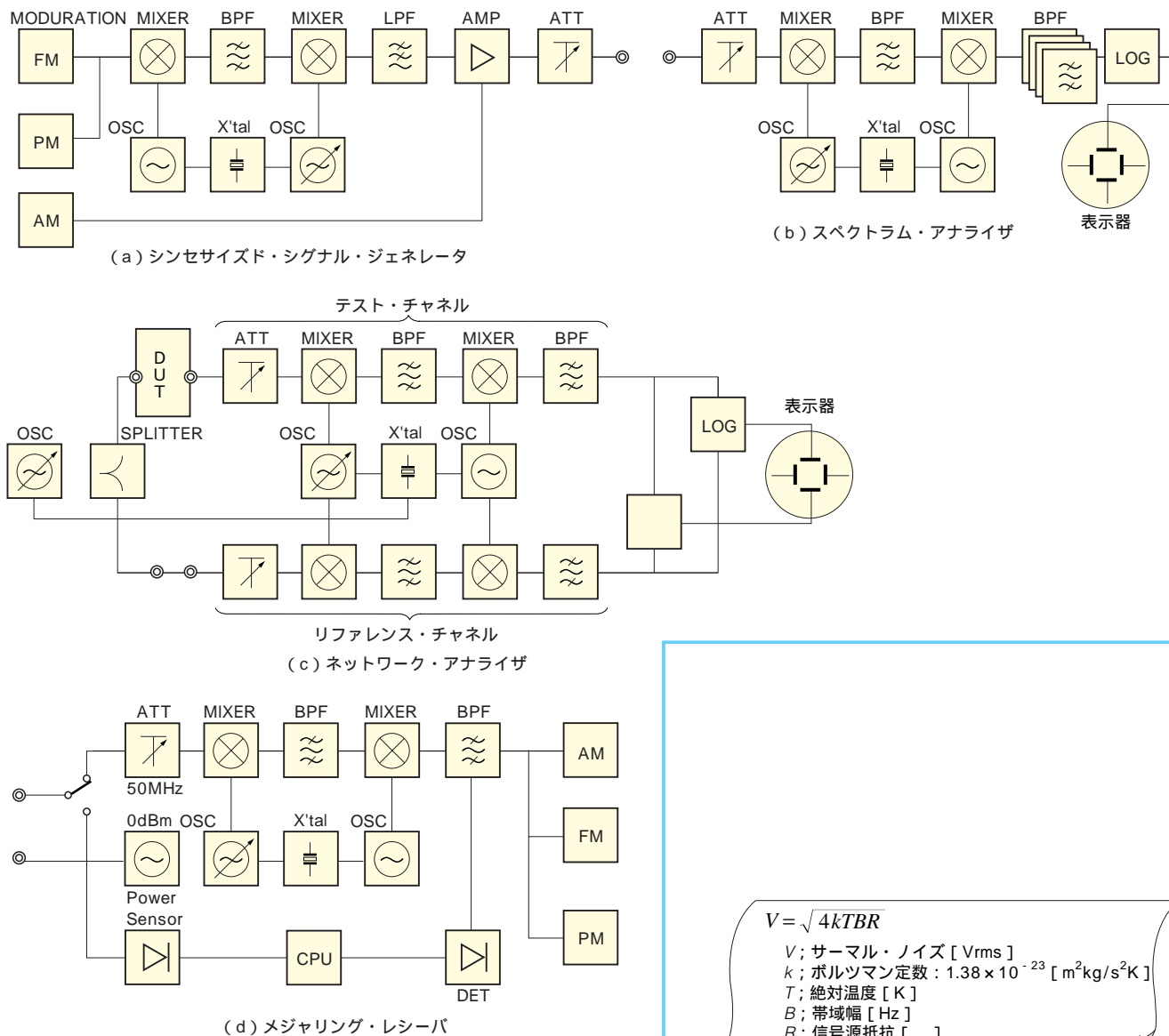



図1 高周波機器のブロック図の例
いくつかのコンポーネントで構成される．

$$V=\sqrt{4kTBR}$$

V；サーマル・ノイズ［Vrms］
k；ボルツマン定数：1.38×10^{-23} ［m^{2}kg/s^{2}K］
T；絶対温度［K］
B；帯域幅［Hz］
R；信号源抵抗［Ω］

図3 熱雑音の計算式

囲は可変ゲイン・アンプで調節するのが一般的となってきています．

2 ブロック図をもとにレベル・ダイヤグラムを作成

高周波信号は50 Ω伝送が基本です．伝送路のインピーダンス設計が的確に行われているとすれば，あとは周波数特性と入出力レベルの設計が主になります．その際に作成するのがレベル・ダイヤグラムです．この段階でコンポーネントの仕様が決まっていきます．

図2にRF測定器のレベル・ダイヤグラムの例を示します．一番初めにコンポーネント・レベルでのブロック図があります．次に入力信号のダイナミック・レンジを記入します．ダイナミック・レンジは，アッテネータやアンプでコンポーネントのダイナミック・レンジをオーバしないように調節されます．

熱ノイズは信号がこのレベルに入ると，測定不可能となることを示す測定限界点と考えられます．これは温度と帯域で決まります（図3）．

ここで注意することは，各コンポーネントにおける信号帯域です．信号帯域が広いコンポーネントは，ノイズ・レ

	入力	ATT	MIXER	BPF	MIXER	BPF	MIXER	BPF	IF-AMP	Power-AMP / Output
	+20〜-120dBm / 0〜6GHz	0〜-40dB	8〜14GHz	8GHz	8.2GHz	200MHz	221.4MHz	21.4MHz	+80dB	0〜120dB / -120〜+20dBm
GAIN		-40dB	-10dB	-5dB	-10dB	-5dB	-10dB	-5dB	+80dB	
ΔNF（ノイズ・フィギュア）		0dB		-14dB		-10dB		-10dB		
ΔRBW（帯域バンド幅）				-19dB		-15dB		-15dB	+10dB	
RBW		6E9		2E8		2E7		2E6		1
熱力学温度T		300		300		300		300		300
係数k		1.38E-23		1.38E-23		1.38E-23		1.38E-23		1.38E-23
熱雑音(dBm)		-70		-84.8		-94.8		-105		-168

Detector　熱雑音

+10dB　-10dB　-30dB　-50dB　-70dB　-90dB

+20dB　+0dB　-20dB　-40dB　-60dB　-80dB　-100dB　-120dB　-140dB　-160dB　-180dB

図2　RF測定器のレベル・ダイヤグラムの例
ダイナミック・レンジを確保しながら，最終出力までのレベルを設計する．

ベルが上がるため，不要な帯域を制限してノイズ・レベルを下げます．このようにしてダイナミック・レンジを確保しながら，最終出力までのレベルを設計します．

レベル・ダイヤグラム設計ができて，高周波コンポーネントを購入して組み合わせれば，ほとんどの機器で基本的な性能は達成できます．ところが，このコンポーネントを設計する技術が大変難しいため，一般的に高周波コンポーネントは高価です．購入したコンポーネントだけで高周波機器を製作した場合，最終システムの価格はとてつもなく高くなり，売り物になりません．従って高周波測定器メーカは，コンポーネントの開発にしのぎを削るのです．

最近はコンピュータ技術が発達してきたので，高周波コンポーネントの非直線性などをコンピュータで補正し，高い精度を達成しています．その辺のノウハウも重要になってきています．

図4に筆者の設計した100kHz～120MHzのシンセサイズド・シグナル・ジェネレータのコンポーネント例を示します．

3 回路図を基板に展開する

初めに1MHz～1GHzの帯域幅を持つ集中定数型広帯域高ゲイン増幅器の設計例です．ゲインは＋60dBです．集中定数の回路は，SPICEシミュレータで作成します．非線形回路[注2]はSPICEシミュレータの得意とする所です．

次に2.6GHzウィルキンソン型4分配器の設計例を挙げま

注2：非線形とは，入力と出力の関係が1次関数でないものを指す．

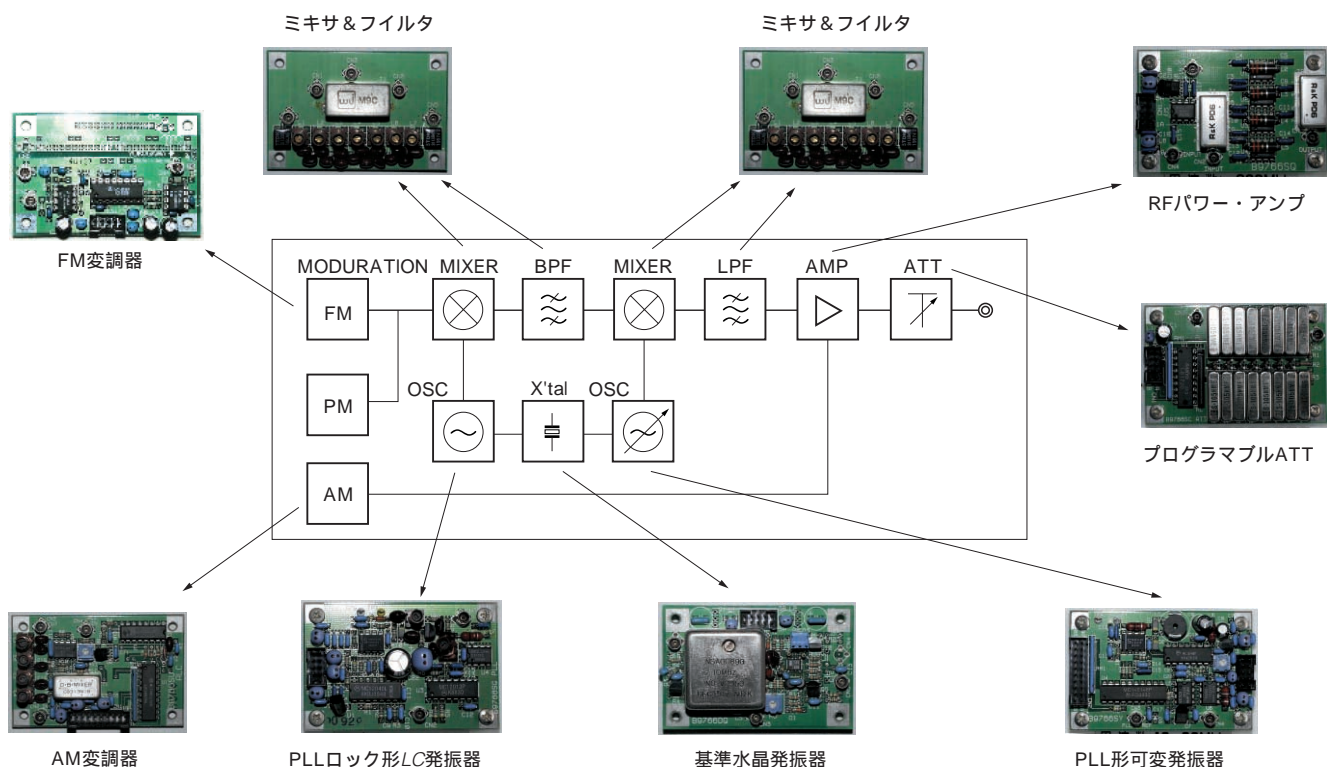



図4　筆者の設計した100kHz～120MHzの帯域幅を持つシンセサイズド・シグナル・ジェネレータのコンポーネント例

す．マイクロ波回路のプリント基板はマイクロ波シミュレータで作成します．たとえ1mmのパターンであっても，それらがすべて回路定数となってしまうからです．

例1　集中定数型広帯域高ゲイン低ノイズ増幅器の設計例

● シミュレータで回路図を作成

初めにシミュレータで回路図を作成します．低ノイズの高周波増幅器（LNA）は，1個のICで作成というわけにはいきません．特に60dB（1000倍）のゲインを持ったICは存在しません．

また，高周波増幅器の伝送路はインピーダンス50Ωで設計するのが基本です．そうすると，負荷も50Ωとなります．トランジスタはエミッタ電流1mAを流すと，26Ωのエミッタ抵抗を持つので，このときのゲインは$G=50/26=$約2倍（＋6dB）となります（**図5**）．

通常は数mA程度の電流を流し，負帰還をかけて10dB程度のゲインを確保しておきます．従って，60dBのゲインを取るには6段の多段増幅器となります．このとき各段のゲインが10dBずつ等しくなるように設計します．

設計の際に役立つのがSPICE系シミュレータです．筆者が長年愛用している米国Beige Bag Software社のB2 Spiceは，使いやすくて5万円程度で購入できる，フルバージョンのSPICEシミュレータです．座右のシミュレータとも呼べるものです．v4が筆者の一番お気に入りです．B2 Spiceで作成した回路図を**図6**に示します．このLNAは，＋10dBm（$2V_{p\text{-}p}$@50Ω）の正弦波を無ひずみで出力できますが，GHzでこれだけの出力を出すのはなかなか難しく，すぐに波形がひずんでしまいます．ひずみやすい回路の設計を確認するには，非線形性のシミュレーションが得意なSPICE系シミュレータが最適です．

● 特性のシミュレーション

図7にシミュレーション結果を示します．10dBのゲインを持つ増幅器が6段重なり，60dBのゲインとなっています．高域に向かってゲインが持ち上がっていますが，実際の伝送線路の損失などを考慮に入れて，このような特性にしています．実回路において周波数特性がフラットになります．

● 実際にプリント基板を作成して性能を検証

実際にプリント基板を作成して性能を検証してみました．

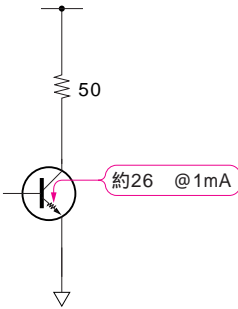



図5　トランジスタのエミッタ抵抗

エミッタ電流1mAを流すと約26Ωのエミッタ抵抗を持つ．

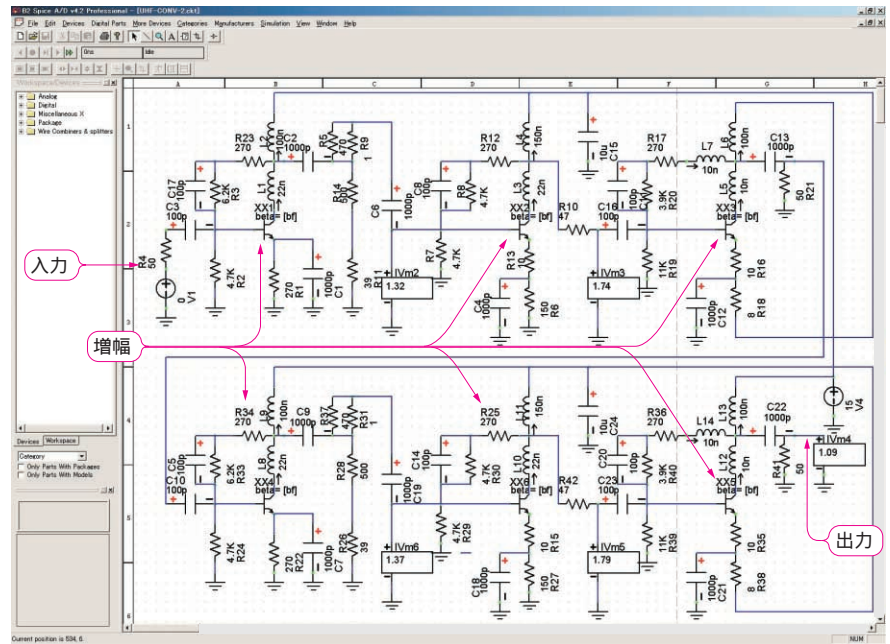



図6　1MHz～1GHzの帯域と＋60dBを持つLNAの設計例

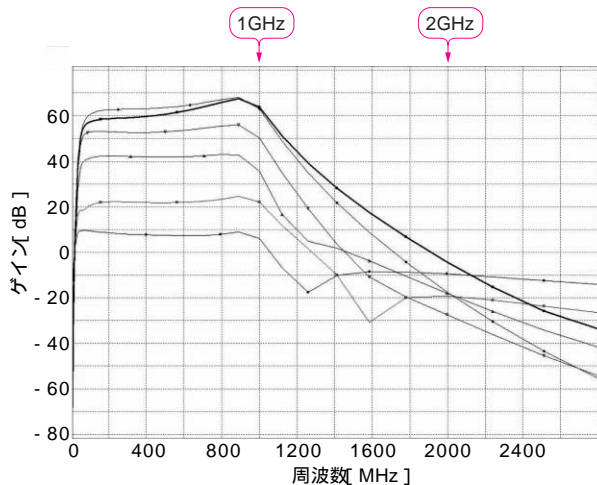



図7　図6の回路のシミュレーション結果

10dBゲインを持つ増幅器が6段重なり，60dBのゲインとなっている．

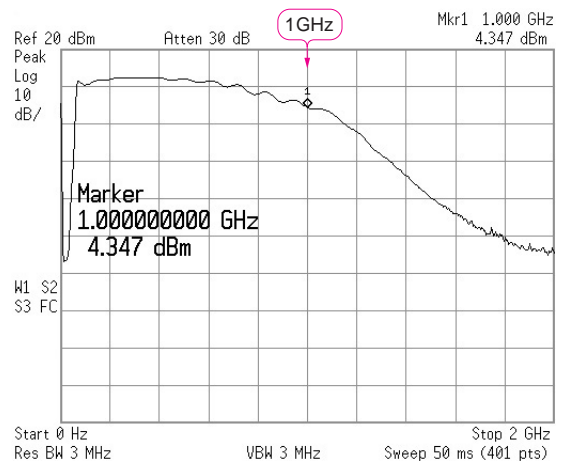



図8　図6の回路を製作し，実際に測定した結果

このような高いゲインを持つ増幅器にはシールド・ケースが不可欠です．試作時にプリント基板を5mmのスタッドで実装しました．すると，見事に発振して使い物になりませんでした．原因はプリント基板の共振です．次にプリント基板の裏面を全面アースとし，シールド・ケースにぴったりとくっつけて実装したところ安定に動作し，図8のような特性が得られました．このようにして完成したLNAを写真1に示します．

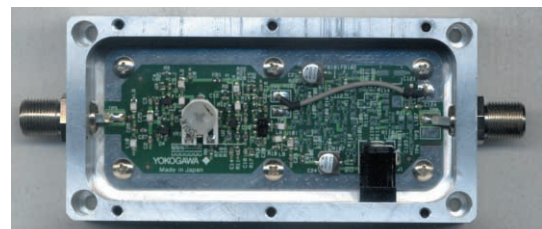



写真1　1MHz～1GHzの帯域と＋60dBの利得を持つLNA

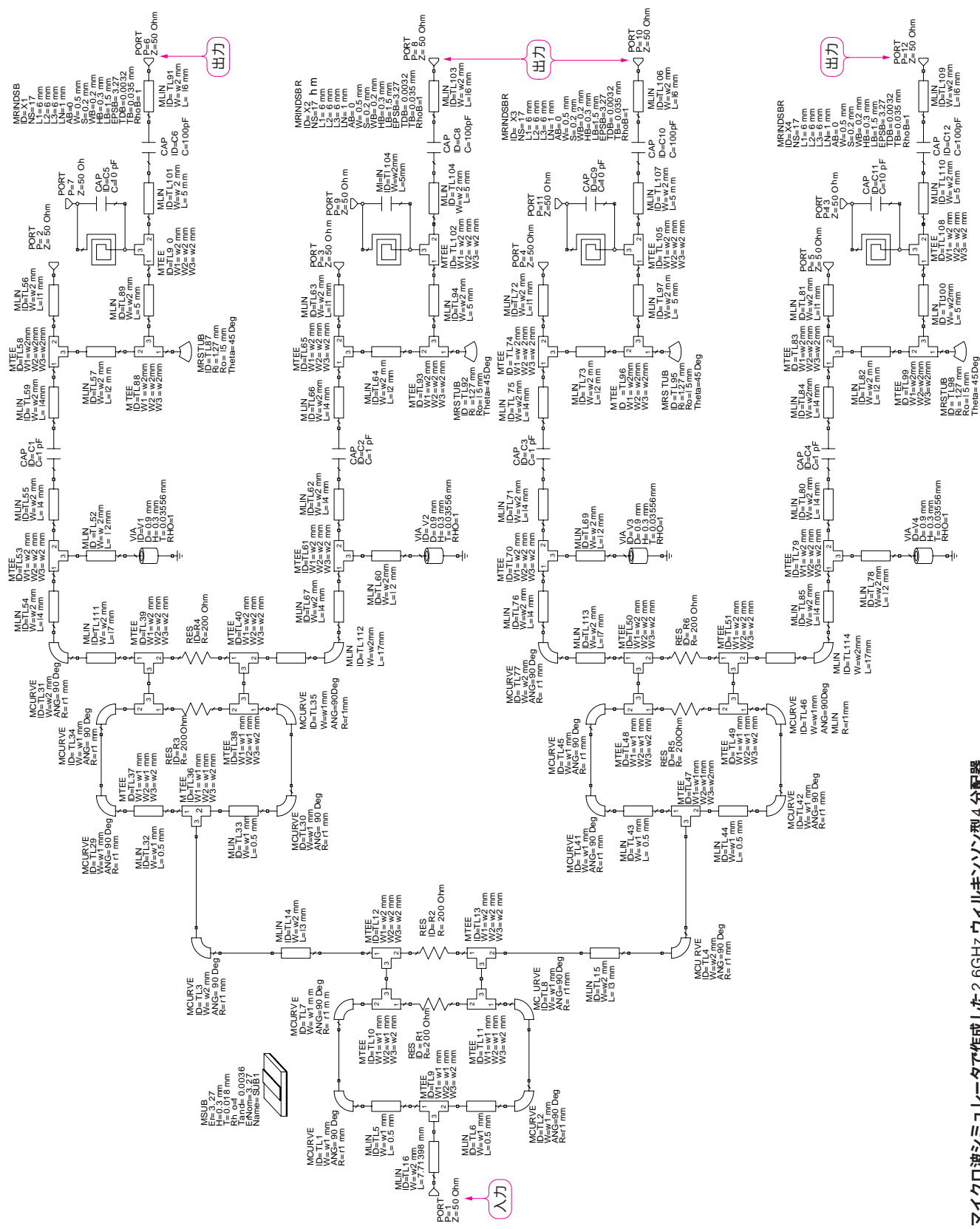



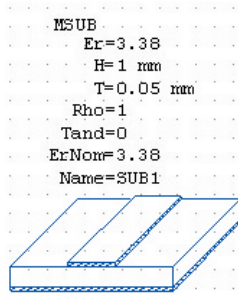
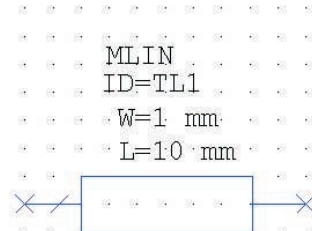
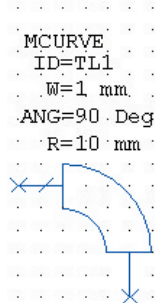
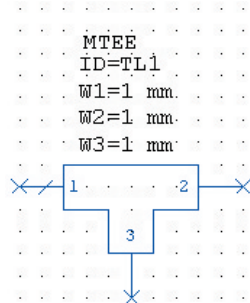
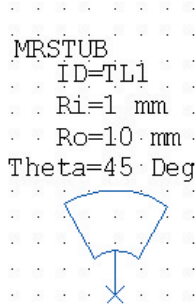
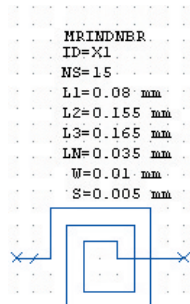
図9 マイクロ波シミュレータで作成した2.6GHzウィルキンソン型4分配器

(a) サブストレート　(b) マイクロストリップ線路

(c) マイクロストリップ・ベンド　(d) マイクロストリップ・ジャンクション

(e) マイクロストリップ・ラジアル・スタブ　(f) マイクロストリップ・インダクタ

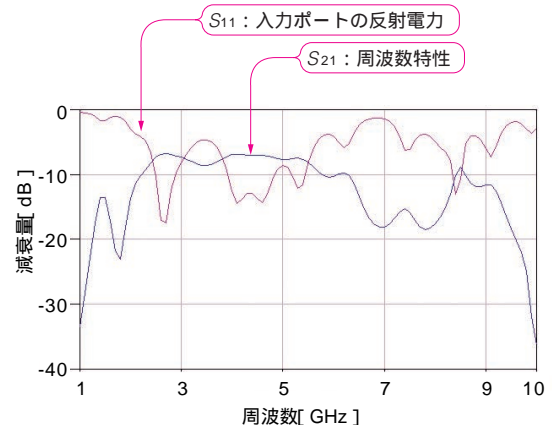
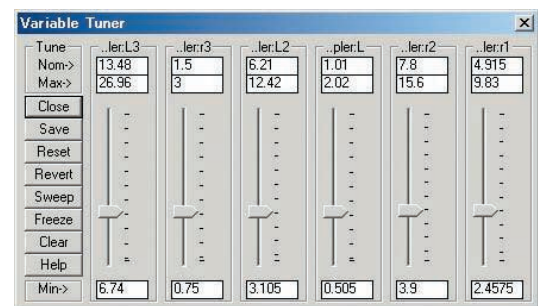
図10　図9で使用している主な回路素子

(a) 周波数特性

(b) リアルタイム・チューニング・パネル

図11　図9の回路のシミュレーション結果

(b)のレバーを動かすとリアルタイムに素子値やシミュレーション結果，配線パターンが変化する．

例2　2.6GHzウィルキンソン型4分配器の設計例

● シミュレータで回路図を作成

初めにマイクロ波シミュレータで回路図を作成します(**図9**)．主な回路素子には以下のものがあります．

① サブストレート[**図10(a)**]
② マイクロストリップ線路[**図10(b)**]
③ マイクロストリップ・ベンド[**図10(c)**]
④ マイクロストリップ・ジャンクション　[**図10(d)**]
⑤ マイクロストリップ・ラジアル・スタブ[**図10(e)**]
⑥ マイクロストリップ・インダクタ[**図10(f)**]

ここでは物理寸法の回路素子を入力して回路図を作成します．マイクロストリップ線路の解説書は，森 栄二氏の「マイクロウェーブ技術入門講座」(CQ出版社)が有名です．

● 特性のシミュレーション

回路図が完成したらシミュレータを走らせて，特性を調べます(**図11**)．**図11(b)**において，それぞれのレバーが素子値となっており，動かすとリアルタイムに素子値が変化します．その結果，シュミレーション特性や配線パターンもリアルタイムに変化します．ここで問題が発生したら回路図を修正します．これを何度か繰り返し，仕様を満足させる特性を得ます．

米国Applied Wave Reserch(AWR)社のMicrowave Officeのすごい所は，特性を見ながら素子値を変化させ，最終特性をシミュレーションできることです．リアルタイムでチューニングができます．ほかにこのようなことができるシミュレータを筆者は知りません．筆者のお気に入りのマイクロ波シミュレータです．

図12　ウィルキンソン型4分配器のパターン例

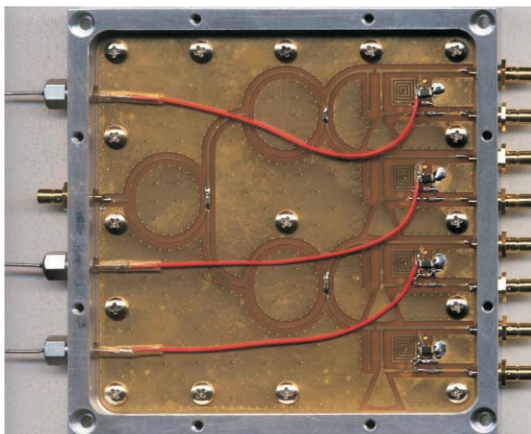



写真2　図9をもとに製作したウィルキンソン4分配器

(a) 8mm×32mm×64mm，シールド・ケースの通過特性

(b) 4mm×32mm×64mm，シールド・ケースの通過特性

図13　シールド・ケースの通過特性
8mm厚のシールド・ケースは10GHz以上で信号が通過しているが，4mm厚のシールド・ケースは20GHzまで減衰量が取れている．

● パターン・データをプリント基板CADに転送してパターンを作成

次に配線パターンのデータをプリント基板CADに転送します．ガーバ・データ，DXF(Drawing Interchange File)など，いろいろなフォーマットで転送が可能です．おおよそのレイアウトは，図12のようにシミュレータ上でも確認可能です．

● 実際にプリント基板を作成して性能を検証

製作したウィルキンソン4分配器の実装例を写真2に示します．このとき，基板が共振しないようにアルミ・ブロック・ケースにしっかりと貼り付けます．このときアルミ・ブロック・ケースとの間にすき間があると，不必要な共振を招くので，使用帯域の1/10 λ間隔でしっかりとねじ止めします．

コネクタもストリップ線路のインピーダンスを乱さないように，丁寧に取り付けます．アルミ・ブロックの高さはなるべく低く作成します．8mm以上の高さではアルミ・ブロック・ケースが導波管となり，10GHz以上の信号は何も接続しなくても入出力の同軸コネクタ間を通過してしまいます．

8mm × 32mm × 64mmのシールド・ケースの通過特性を図13(a)に示します．次に4mm × 32mm × 64mm のシールド・ケースの通過特性を図13(b)に示します．8mm厚のシールド・ケースは10GHz以上で信号が通過していますが，4mm厚のシールド・ケースは20GHzまで減衰量が取れています．これはフィルタ回路などで不要な信号を確実に削除するために重要な事柄です．

つの・とおる
横河電機(株)